

# Schaltungen mit Feldeffekttransistoren

Anregungen für den Schulunterricht zur  
Behandlung der Leitungsvorgänge in Halbleitern

Wissenschaftliche Arbeit  
zur Erlangung der ersten Staatsprüfung  
für das Lehramt am Gymnasium

Universität Leipzig  
Fakultät für Physik und Geowissenschaften  
Bereich Didaktik der Physik

vorgelegt von: Jens Hunger  
geboren am: 19.09.1979  
Betreuer: Prof. Dr. Wolfgang Oehme  
2. Gutachter: Dr. Peter Rieger

Leipzig, den 31.08.2006

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| Einleitung   | 1         |
| <b>I Grundlagen</b>                                    | <b>2</b>  |
| <b>1 Bipolartransistoren</b>                           | <b>2</b>  |
| 1.1 Aufbau und Ersatzschaltbilder . . . . .            | 2         |
| 1.2 Kennlinien und Stromverstärkung . . . . .          | 4         |
| 1.3 Herstellung . . . . .                              | 6         |
| 1.3.1 Einzeltransistoren . . . . .                     | 7         |
| 1.3.2 Integrierte Transistoren . . . . .               | 8         |
| 1.4 Grundsaltungen . . . . .                           | 11        |
| <b>2 Feldeffekttransistoren</b>                        | <b>12</b> |
| 2.1 Zur Geschichte des Feldeffekttransistors . . . . . | 12        |
| 2.2 Der Begriff „Feldeffekttransistor“ . . . . .       | 12        |
| 2.3 Aufbau des Feldeffekttransistors . . . . .         | 13        |
| 2.4 Die Typen von Feldeffekttransistoren . . . . .     | 14        |
| 2.4.1 Funktionsprinzip von MOSFETs . . . . .           | 15        |
| 2.4.2 Die vier Arten von MOSFETs . . . . .             | 16        |
| 2.4.3 Funktionsprinzip von JFETs . . . . .             | 20        |
| 2.5 Kennlinien von Feldeffekttransistoren . . . . .    | 22        |
| 2.6 Übersicht zu den Feldeffekttransistoren . . . . .  | 24        |
| <b>II Schaltungen</b>                                  | <b>26</b> |
| <b>3 npn-Transistor</b>                                | <b>27</b> |
| 3.1 Kennlinien . . . . .                               | 27        |
| 3.1.1 Eingangskennlinie . . . . .                      | 27        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.1.2    | Übertragungskennlinie . . . . .                  | 28        |
| 3.1.3    | Ausgangskennlinien . . . . .                     | 32        |
| 3.1.4    | Verstärkungskennlinie . . . . .                  | 36        |
| 3.2      | Ausgangskennlinie mittels Oszilloskop . . . . .  | 37        |
| 3.3      | Kleinsignalverstärker . . . . .                  | 42        |
| 3.4      | Der Transistor als Schalter . . . . .            | 46        |
| 3.4.1    | ... mit mechanischem Schalter . . . . .          | 46        |
| 3.4.2    | ... mit Fotowiderstand . . . . .                 | 48        |
| 3.4.3    | ... mit Thermistor . . . . .                     | 51        |
| <b>4</b> | <b>Selbstsperrender n-Kanal-MOSFET</b>           | <b>56</b> |
| 4.1      | Übertragungskennlinie . . . . .                  | 56        |
| 4.2      | Ausgangskennlinien . . . . .                     | 60        |
| 4.3      | Ausgangskennlinien mittels Oszilloskop . . . . . | 63        |
| 4.4      | Kleinsignalverstärker . . . . .                  | 66        |
| 4.5      | Der Transistor als Schalter . . . . .            | 69        |
| 4.5.1    | ... mit mechanischem Schalter . . . . .          | 69        |
| 4.5.2    | ... mit Fotowiderstand . . . . .                 | 71        |
| 4.5.3    | ... mit Thermistor . . . . .                     | 74        |
| 4.6      | Verzögerungsschaltung . . . . .                  | 78        |
| <b>5</b> | <b>Selbstleitender n-Kanal-MOSFET</b>            | <b>82</b> |
| 5.1      | Übertragungskennlinie . . . . .                  | 83        |
| 5.2      | Ausgangskennlinien . . . . .                     | 86        |
| 5.3      | Ausgangskennlinien mittels Oszilloskop . . . . . | 89        |
| 5.4      | Kleinsignalverstärker . . . . .                  | 92        |
| 5.5      | Der Transistor als Schalter . . . . .            | 94        |
| 5.5.1    | ... mit mechanischem Schalter . . . . .          | 94        |
| 5.5.2    | ... mit Fotowiderstand . . . . .                 | 96        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.5.3    | ... mit Thermistor                     | 98         |
| <b>6</b> | <b>n-Kanal-JFET</b>                    | <b>101</b> |
| 6.1      | Übertragungskennlinie                  | 101        |
| 6.2      | Ausgangskennlinien                     | 105        |
| 6.3      | Ausgangskennlinien mittels Oszilloskop | 108        |
| 6.4      | Kleinsignalverstärker                  | 111        |
| 6.5      | Der Transistor als Schalter            | 114        |
| 6.5.1    | ... mit mechanischem Schalter          | 114        |
| 6.5.2    | ... mit Fotowiderstand                 | 116        |
| 6.5.3    | ... mit Thermistor                     | 119        |
| <b>7</b> | <b>Gesteuerter Widerstand</b>          | <b>123</b> |
| 7.1      | Grundprinzip                           | 123        |
| 7.2      | Linearisierung des Widerstandes        | 124        |
| 7.3      | Spannungsteiler mit Transistoren       | 126        |
| 7.4      | Widerstandsverhalten von Transistoren  | 133        |
|          | <b>Zusammenfassung</b>                 | <b>138</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>            | <b>141</b> |
|          | <b>Eidesstattliche Erklärung</b>       | <b>143</b> |

### 6.4 Kleinsignalverstärker

Mit einem n-Kanal-JFET lassen sich Signale verstärken.

#### Hinweise für das Simulationsexperiment

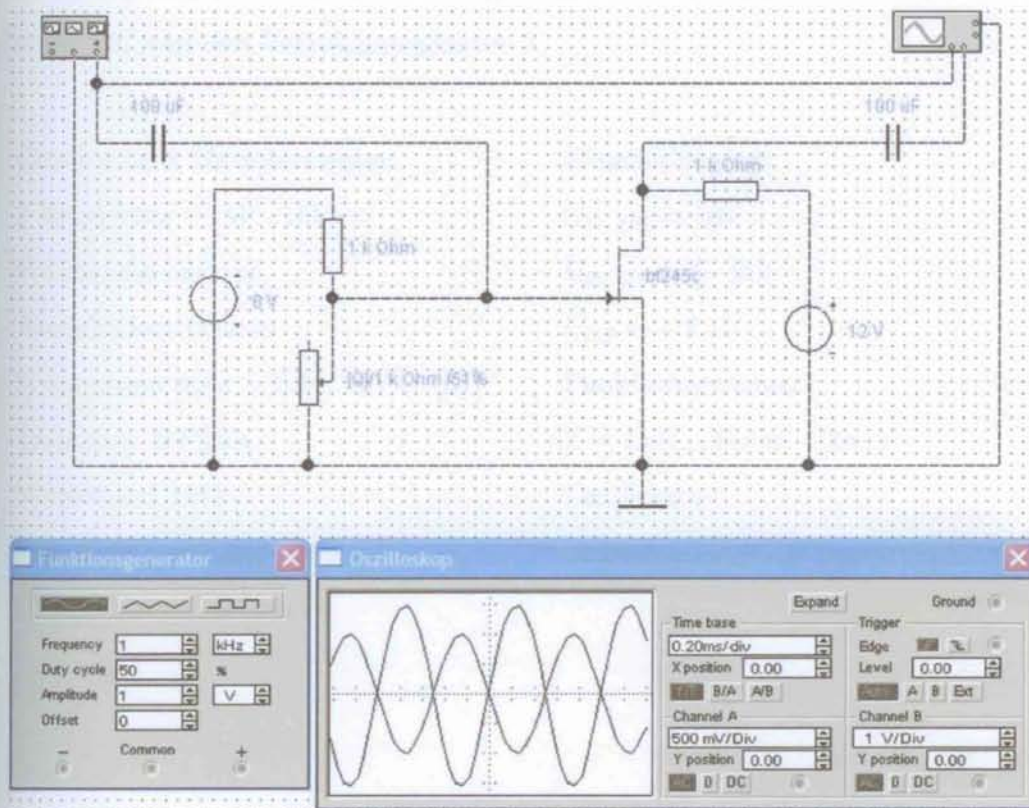


Abbildung 81: Simulationsschaltung *njfet\_sigver.ewb* für einen n-Kanal-JFET als Kleinsignalverstärker

### Hinweise für das Realexperiment

Nach dem Aufbau der Schaltung (vgl. Abb. 82) werden der Arbeitspunkt ( $U_{DS} = 5V$ , über  $220\Omega$  Potentiometer regeln) und die angegebenen Werte an den Geräten eingestellt. Die Signalstärke am Funktionsgenerator ist so zu justieren, dass am Oszilloskop eine glatte Sinuskurve angezeigt wird. Mit dem beschriebenen Aufbau erhält man den Verstärkungsfaktor 3.

#### Geräte und Bauelemente:

2 Netzgeräte  $-15V...15V=$

Funktionsgenerator

Zweikanaloszilloskop

Spannungsmesser  $-10V...10V=$  (M)

Transistor *BF245C*

Widerstand  $1k\Omega$

Potentiometer  $220\Omega$

2 Kondensatoren  $100\mu F$

#### Einstellungen:

$U_{B, DS} = 10V$

$U_{B, GS} = (-)5V$

$U_{GS} \approx -2.5V$

Funktionsgenerator:

$f = 1kHz$ , Sinus,  $100mV$

Oszilloskop:

( $0.2ms$ ,  $0.1V AC$ ,  $0.2AC$ )

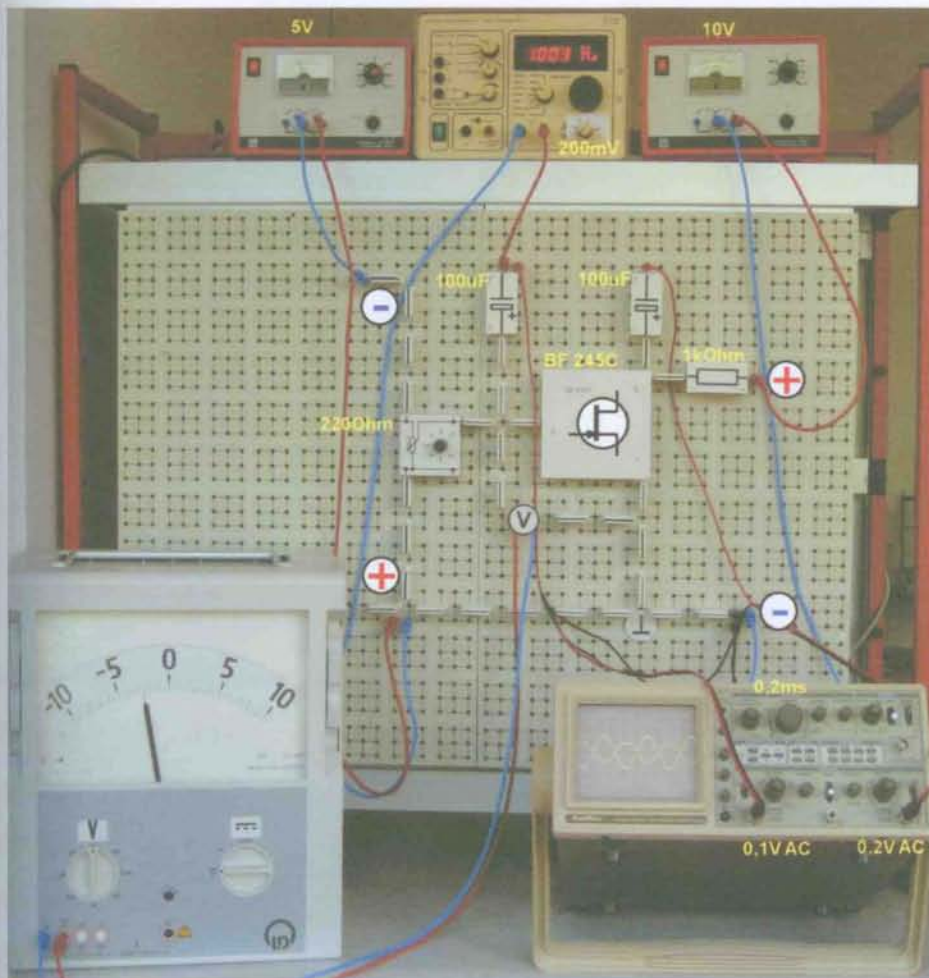


Abbildung 82: Demonstrationsaufbau *njfet\_sigver* für die Schaltung eines n-Kanal-JFETs als Kleinsignalverstärker

### 6.5.2 ... mit Fotowiderstand

Die Schaltung kann in zwei Varianten aufgebaut werden, entweder als Hell-Hell- (Abbildung 84) oder Hell-Dunkel-Schaltung (Abbildung 85).

#### Hell-Hell-Schaltung

Nach dem Aufbau der Schaltung wird zum Einstellen die Glühlampe ausgeschaltet und die Stellung des  $1k\Omega$  Potentiometers so geändert, dass die LED gerade ausgeht. Nach dem Einschalten der Glühlampe zeigt die LED an, dass der Transistor durchschaltet.

#### Hell-Dunkel-Schaltung

Für den Aufbau der Hell-Dunkel-Schaltung wird der Fotowiderstand mit dem  $1k\Omega$  Potentiometer getauscht. Zum Einstellen wird die Glühlampe eingeschaltet und die Stellung des  $1k\Omega$  Potentiometers so geändert, dass die LED gerade ausgeht. Der Transistor schaltet nun, wenn die Glühlampe aus ist (dunkel). Die LED leuchtet. Er sperrt, wenn sie eingeschaltet wird (hell). Die LED erlischt.

#### Geräte und Bauelemente:

2 Netzgeräte  $-15V...15V=$

Transistor *BF245C*

Glühlampe  $6V, 3W$

LED  $20mA$

Widerstand  $100\Omega$

Potentiometer  $1k\Omega$

Fotowiderstand (LDR)

Schalter (mechanisch)

#### Einstellungen:

$U_B = 6V$

$U_{B-Lichtquelle} = 6V$



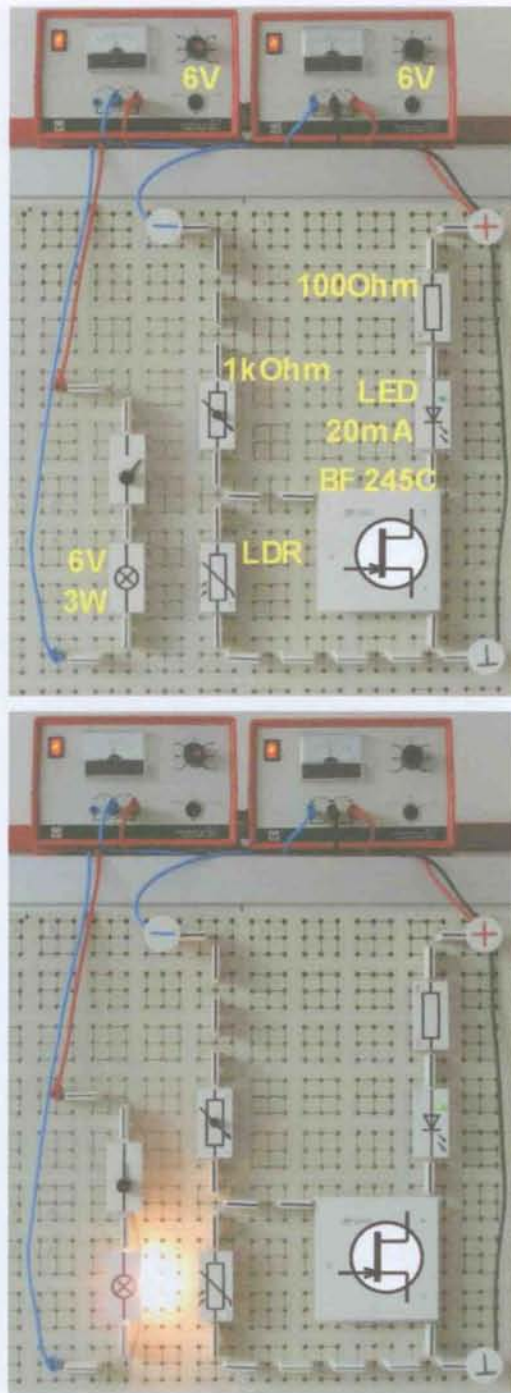


Abbildung 84: Demonstrationsexperiment *njfet\_schalt\_opt* für einen n-Kanal-JFET als Schalter (optisch gesteuert; Hell-Hell-Schaltung)

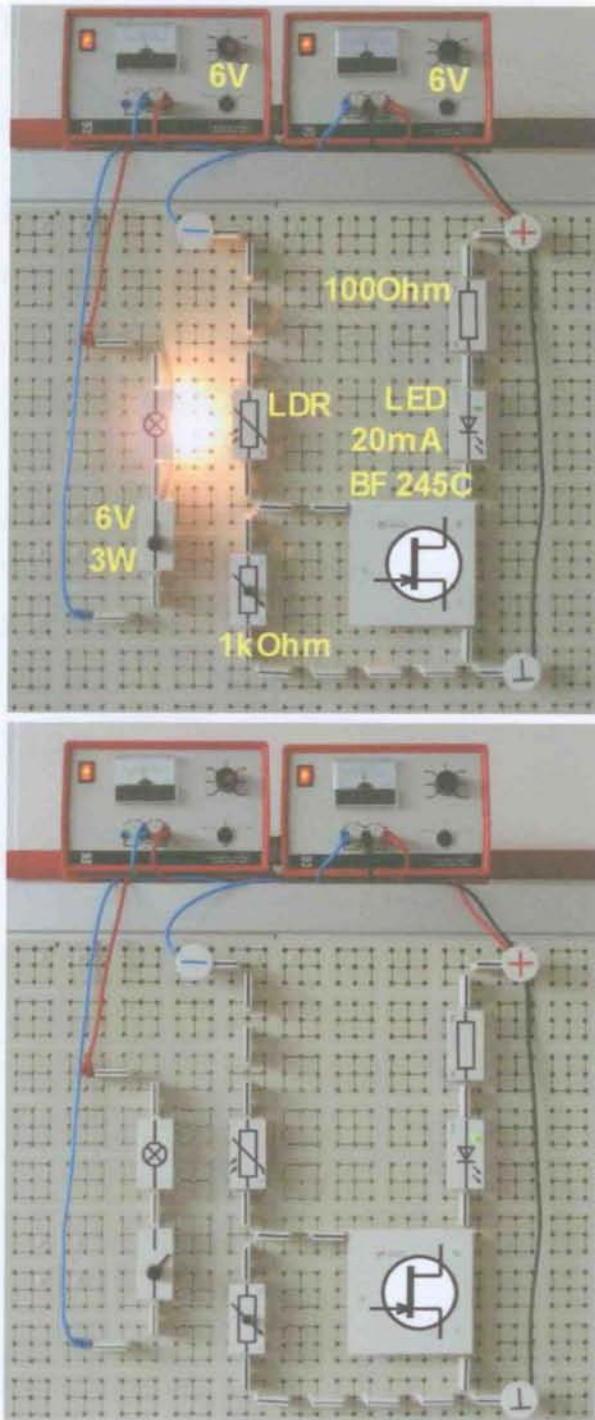


Abbildung 85: Demonstrationsexperiment *njfet\_schalt\_opt2* für einen n-Kanal-JFET als Schalter (optisch gesteuert; Hell-Dunkel-Schaltung)